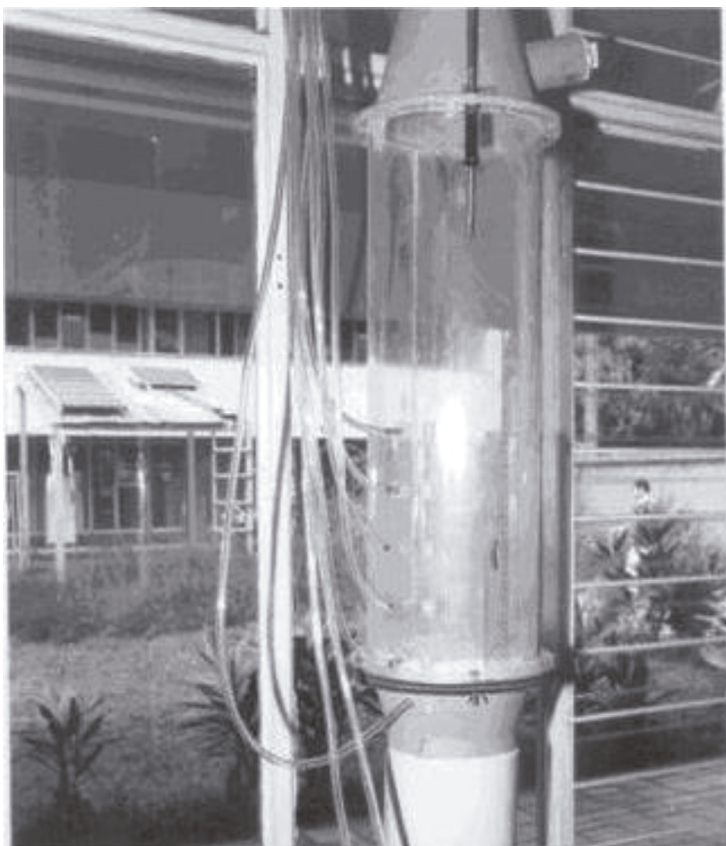


Modelamiento, calibración y control difuso para el proceso de secado de arveja usando lecho fluidizado

JOSÉ I. GARCÍA¹



Resumen

La producción de arveja en los países andinos representa un importante sector tanto para la economía como para la alimentación de la población. Sin embargo, la producción de este producto se caracteriza por una falta de eficiencia. De esta forma, se hace recomendable un mejoramiento continuo de las diferentes actividades del proceso de producción, como por ejemplo el secado. En este sentido, el presente trabajo desarrolla tanto un modelado del proceso de sacado como un control difuso del proceso de secado de arveja en un lecho fluidizado inclinado, donde el modelado se basa en la ley de conservación de masa y la ley de Fick. Adicionalmente, el sistema de control considera un conocimiento heurístico de un operador experto, a partir del cual se definieron dos variables manipuladas y una variable de entrada. Las variables a manipular fueron la temperatura del aire, la cual permite el cambio en la difusividad y, por tanto, en la curva de secado, y la inclinación del lecho fluidizado. La señal de entrada al controlador fue definida como la diferencia entre la humedad final y la humedad deseada

⁽¹⁾ Ingeniero mecánico. Docente de la Universidad del Valle, Cali, Colombia. Correo electrónico: jose.i.garcia@correounivalle.edu.co.
Fecha de recepción: 12/12/2014 – Fecha de aceptación: 30/06/2015.

del producto. Del mismo modo, con el objetivo de calibrar el modelo del proceso que permitirá, posteriormente, verificar y validar el funcionamiento de la propuesta de control, fueron realizadas pruebas en laboratorio (Universidad del Valle) de lecho fluidizado. Finalmente, se presentan algunos comentarios relevantes.

Palabras clave: control difuso, lecho fluidizado, difusividad, humedad, arveja.

Abstract

Pea production in the Andean countries represents an important sector for the economy as well as to supply food for the population. However, production of this product is characterized by a lack of efficiency. Thus, it is advisable to continuously improve the various activities of the production process, such as drying. Regarded to this, in this work the dynamic modeling and fuzzy control of the drying process of pea in an inclined fluidized bed are developed. Where modeling is based on the law of conservation of mass and Fick's law. Additionally, the control system considers a heuristic knowledge of an experienced operator. Where two input and one output variables were defined. The temperature of the dry air at the entrance of the bed and the bed's inclination were considered as the manipulated variables. The moisture of the product at the outlet of the bed was defined as the input variable. Additionally, in order to calibrate the model of the process, which afterwards will allow to verify and validate the performance of the proposed control, tests at the Fluidized Bed Laboratory of the Universidad of Valle were conducted. Finally, relevant comments are presented.

Keywords: fuzzy control, fluidized bed, diffusivity, humidity, green pea.

1. Introducción

La arveja pertenece a la familia de las leguminosas, al igual que el frijol, el garbanzo y la lenteja [1]. Este producto es relevante tanto para la economía como para la alimentación de la población en

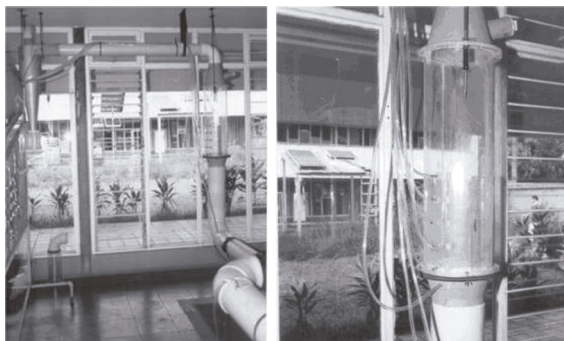
algunos países del área andina, como, por ejemplo, Ecuador y Colombia. Desde el punto de vista económico, es un generador de empleo no calificado, en virtud del número de actividades manuales necesarias para la producción, estimándose una dependencia aproximada de 26.000 productores, los cuales generan alrededor de 15.000 empleos directos en 14 departamentos nacionales; además, en conjunto con el tomate, cebolla, zanahoria, entre otros, concentran el 85 % del área sembrada [2, 1]. Desde el punto de vista alimenticio, este producto se caracteriza por ser una buena fuente de proteínas, fibras, vitaminas (A, B, C) y carbohidratos, y por ser bajo en grasa [3]. Sin embargo, según Vallejo [2], la producción nacional de arveja se caracteriza por una falta de eficiencia derivada de una limitada inclusión tecnológica, unida a un deficiente manejo de la poscosecha. De esta forma, se hace recomendable un mejoramiento continuo en el proceso de producción, por no decir que necesario. En este sentido, considerando al secado de la arveja como una de las actividades relevantes para su almacenamiento, es beneficiosa la tecnificación de esta actividad utilizando métodos eficientes, como el lecho fluidizado. Esto, debido a que un grano carente de las condiciones propicias de humedad, facilita el crecimiento de microorganismos nocivos para el producto, afectando su calidad. En este contexto, varios métodos de secado han sido aplicados, empezando por el aprovechamiento directo de la energía solar, hasta métodos artificiales que utilizan energía de combustión y métodos eléctricos o mecánicos para aumentar la temperatura del aire [4]. El secado de la arveja por lecho fluidizado es una técnica que permite eliminar uniformemente la humedad del grano. Para esto, se permite el paso de un gas o líquido a través de un lecho donde se encuentra depositado el producto a una velocidad controlada para generar una condición de suspensión de los granos [5]. Además, para un secado uniforme de arveja, esta técnica demanda mantener una temperatura determinada del fluido. En este contexto, considerando las complejidades del proceso de secado derivadas de las no-linealidades y retardos de tiempo, una efectiva implementación de estrategias de control convencionales requiere consideraciones restrictivas que influyen de manera negativa en la precisión de un controlador. Según Abramovitch y Bushnell [6], el control difuso es un abordaje recomendable para abordar esas complejidades. Así, este tipo de estrategia provee un medio para convertir una estrategia de control lingüística. De

esta forma, es posible sistematizar en el conocimiento de un operador experto en una estrategia de control automática disponible para el proceso [7]. Varios trabajos han sido implementados en procesos de secado de grano mediante este tipo de control, tales como: Liu et al. [7], Watano y Miyayami [8], Atthajariyakul y Leephakpreeda [9], Yuzgec et al. [10] y Lutff et al. [11], evidenciando las bondades de esta solución.

2. Materiales y métodos

La Figura 1 muestra el equipo de lecho fluidizado donde fueron verificadas las propuestas de este trabajo. Este se encuentra localizado en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle, Cali, Colombia.

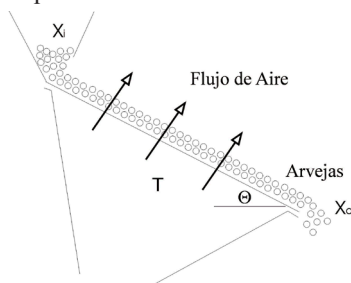
Figura 1. Sistema de lecho fluidizado localizado en la Universidad del Valle



Fuente: elaboración propia.

Básicamente, el equipo estaba integrado de una tolva de alimentación (T) donde se depositaban las arvejas (X_i), un flujo de aire caliente, el cual permitía graduar la inclinación (θ) para garantizar un paso de aire perpendicular a la trayectoria del producto y una boquilla de salida del producto final, X_o (ver Figura 2).

Figura 2. Esquema del sistema de lecho fluidizado



Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente, para el planteamiento correspondiente al modelo del proceso de secado fue utilizada la ley de difusión de Fick, la cual establece que el flujo difusivo que atraviesa una superficie es directamente proporcional al gradiente de concentración [11]. Además, se hizo una calibración del modelo mediante pruebas de laboratorio realizadas con el equipo definido anteriormente. Para el control de humedad en la arveja, se planteó una estrategia basada en lógica difusa, considerando como entrada el error en la humedad del producto y como salidas la temperatura del aire y la inclinación del lecho fluidizado. Con la finalidad de validar y verificar la estrategia propuesta, esta se simuló con el programa Matlab, utilizando como planta el modelo del proceso de secado calibrado obtenido.

3. Modelado del proceso de secado de la arveja

Para la obtención del modelo usando la ley de difusión de Fick, fueron planteadas algunas hipótesis, tales como: se consideró la arveja como una esfera de radio r , con una transferencia de masa por difusión en el grano (en forma radial), y, adicionalmente, también se consideró despreciable la masa de agua en el interior del volumen de control derivada de las reacciones químicas entre el agua y el producto.

Según Méndez y Villa [13], las leyes que rigen los procesos de difusión de materia o masa son: la ley de conservación de masa y la ley de Fick, donde la combinación de estas dos leyes expresadas en coordenadas esféricas define la ley de difusión de masa como:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\rho D_{AB} r^2 \frac{\partial m_A}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\rho D_{AB} \frac{\partial m_A}{\partial \phi} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\rho D_{AB} \sin \theta \frac{\partial m_A}{\partial \theta} \right) + \dot{n}_A = \frac{\partial \rho_A}{\partial t}$$

Donde: r es el radio de la arveja, ρ es la densidad total, \dot{n}_A es el cambio de la difusividad del agua en la arveja con respecto al tiempo, D_{AB} la difusividad de la masa de la fase A, m_A la fracción de masa de la fase A, ρ_A es la densidad de la fase A y t el tiempo.

De acuerdo con las hipótesis planteadas, la Ec. (1) se reduce a:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\rho D_{AB} r^2 \frac{\partial m_A}{\partial r} \right) = \frac{\partial \rho_A}{\partial t} \quad (2)$$

Considerando mínimas las variaciones de temperatura, tanto la densidad a lo largo del radio de

la arveja como el coeficiente de difusividad de masa son constantes. Como resultado, el modelo se simplifica conforme con la expresión (3):

$$\frac{1}{r^2} \left[\rho D_{AB} r^2 \frac{\partial^2 m_A}{\partial r^2} + 2 \rho D_{AB} r \frac{\partial m_A}{\partial r} \right] = \frac{\partial(m_A / (Vol))}{\partial t} \quad (3)$$

Donde: Vol es el volumen de la esfera.

Definiendo la humedad y la densidad, respectivamente, por las Ec. (4) y (5):

$$X = \frac{m_{agua}}{m_{seco}} = \frac{m_a}{m_s} \quad (4)$$

$$\rho = \frac{m_a + m_s}{Vol} = \frac{m_s (X + 1)}{Vol} \quad (5)$$

Manipulando la Ec. (3) se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} \left[\frac{X}{(X+1)} \right] + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{X}{(X+1)} \right] = \frac{1}{m_s (X+1) D_{AB}} \frac{\partial X}{\partial t} \quad (6)$$

Definiendo las derivadas parciales mediante las expresiones (7) y (8)

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{X}{X+1} \right) = \frac{(X+1) \frac{\partial X}{\partial r} - \frac{\partial X}{\partial r} \cdot X}{(X+1)^2} = \frac{\partial X}{\partial r} \left[\frac{1}{(X+1)^2} \right] \quad (7)$$

y

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} \left(\frac{X}{X+1} \right) = \frac{1}{(X+1)^2} \frac{\partial^2 X}{\partial r^2} - \frac{2}{(X+1)^3} \left[\frac{\partial X}{\partial r} \right]^2 \quad (8)$$

Las cuales fueron integradas a la Ec. 6 deduciendo la siguiente expresión:

$$\frac{1}{(X+1)^2} \frac{\partial^2 X}{\partial r^2} - \frac{2}{(X+1)^3} \left[\frac{\partial X}{\partial r} \right]^2 + \frac{2}{r} \frac{\partial X}{\partial r} \left[\frac{1}{(X+1)^2} \right] = \frac{1}{m_s (X+1) D_{AB}} \frac{\partial X}{\partial t} \quad (9)$$

Donde, al multiplicar la Ec. (9) por $(X+1)^2$, se obtiene el modelo de secado simplificado de la arveja dado en la Ec. (10).

$$\frac{\partial^2 X}{\partial r^2} - 2(X+1) \left[\frac{\partial X}{\partial r} \right]^2 + \frac{2}{r} \frac{\partial X}{\partial r} = \frac{(X+1)}{m_s D_{AB}} \frac{\partial X}{\partial t} \quad (10)$$

Para resolver este modelo, se representa la segunda derivada mediante una diferencia dividida finita centrada [14]:

$$\frac{\partial^2 X}{\partial r^2} = \frac{X_{i+1}^l - 2X_i^l + X_{i-1}^l}{\Delta r^2} \quad \text{y} \quad \frac{\partial X}{\partial r} = \frac{X_{i+1}^l - X_{i-1}^l}{\Delta r} \quad (11)$$

El superíndice se utiliza para denotar el tiempo y el subíndice denota una discretización entera de la variable r , la cual dentro de la arveja se redefine de acuerdo con la expresión (12),

$$r = \frac{R}{N} n \quad (12)$$

Donde: R es el radio total de la arveja, N es el número de divisiones o capas realizadas en la arveja y n es la división o capa que está siendo evaluada.

Aplicando las Ec. (11) y (12) en la Ec. (10), se obtiene el modelo discretizado de secado de arveja (Ec. 13)

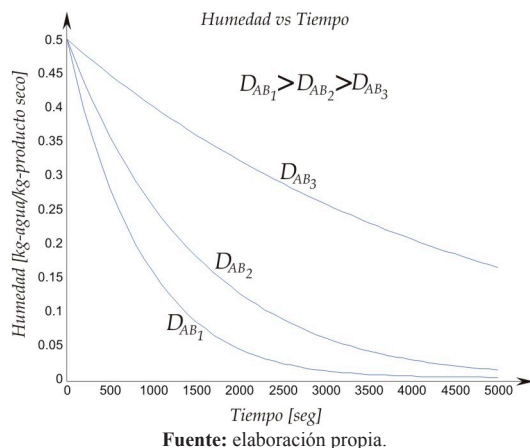
$$\left(\frac{X_{i+1}^l - 2X_i^l + X_{i-1}^l}{\Delta r^2} \right) - 2(X_i^l + 1) \left(\frac{X_{i+1}^l - X_{i-1}^l}{\Delta r} \right)^2 + \frac{2 \cdot N}{R \cdot i} \left(\frac{X_{i+1}^l - X_i^l}{\Delta r} \right) = \frac{(X_i^l + 1)}{m_s D_{AB}} \left(\frac{X_{i+1}^l - X_i^l}{\Delta t} \right) \quad (13)$$

Así, el valor de humedad estimado en $i+1$ se obtiene mediante la expresión (14):

$$X_{i+1}^{l+1} = X_i^l + \frac{\Delta t \cdot m_s \cdot D_{AB}}{(X_i^l + 1)} \left[\left(\frac{X_{i+1}^l - 2X_i^l + X_{i-1}^l}{\Delta r^2} \right) - 2(X_i^l + 1) \left(\frac{X_{i+1}^l - X_{i-1}^l}{\Delta r} \right)^2 + \frac{2 \cdot N}{R \cdot i} \left(\frac{X_{i+1}^l - X_i^l}{\Delta r} \right) \right] \quad (14)$$

Para determinar las condiciones iniciales se toma una muestra de la humedad inicial del producto y se distribuye en cada capa de la arveja. Implementando la Ec. (14), es posible determinar la humedad dentro de la arveja y su evolución temporal una vez sean conocidas las condiciones iniciales y la difusividad D_{AB} . Así, el efecto de la difusividad en la humedad del producto es inverso al tiempo de secado (ver Figura 3) y el tiempo de secado disminuye cuanto mayor sea la difusividad. A manera de ejemplo, la Figura 2 muestra una distribución de humedad en el tiempo para tres índices de difusividad de masa bajo la condición de $D_{AB1} > D_{AB2} > D_{AB3}$. Así las cosas, para una humedad de 0.4 Kg agua/Kg Producto con una difusividad D_{AB1} , se requiere un tiempo de 250 seg, para una difusividad D_{AB2} se requiere de 650 seg y para una difusividad D_{AB3} se requiere de 1000 seg.

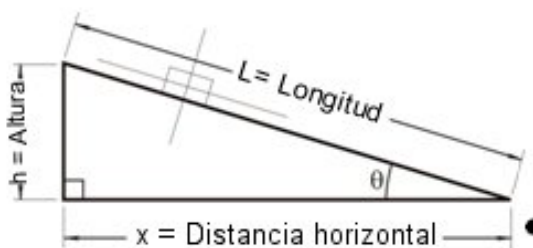
Figura 3. Gráfica de la humedad vs. Tiempo para varios valores de difusividad



4. Análisis del comportamiento del producto en el lecho fluidizado

La calibración del tiempo de permanencia del producto en el lecho fluidizado se realizó por experimentación. Considerando que uno de los factores relevantes en esta operación es la inclinación del lecho fluidizado, se realizó un análisis del comportamiento del producto en tal lecho. Para esto, se construyó el diagrama de cuerpo libre de una partícula durante el desplazamiento en el lecho fluidizado (ver Figura 4). Con una longitud de la trayectoria, L ; una altura, h ; una distancia horizontal, x ; y una inclinación, θ .

Figura 4. Desplazamiento de un grano en el lecho fluidizado



Fuente: elaboración propia.

Definiendo una velocidad inicial (v_{in}) de la arveja al inicio del lecho fluidizado, una velocidad final (v_f) a la salida del lecho, una sección transversal del lecho (A), despreciando las variaciones de masa en la arveja desde la entrada hasta la salida del lecho fluidizado y aplicando la definición de flujo de masa, se obtiene la siguiente expresión:

$$v_{\dot{n}} = \frac{V\dot{m}_{\dot{n}}}{m_{\text{seco}}(1 + X_{\dot{n}})A} \quad (15)$$

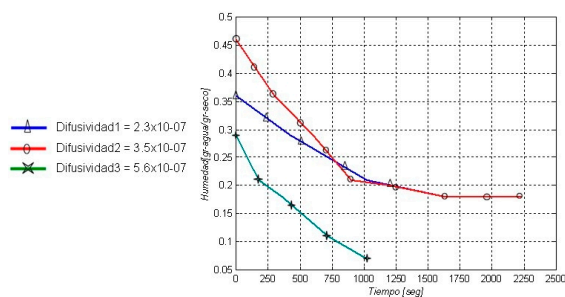
Realizando un balance de energía con una velocidad inicial despreciable, se determinó el tiempo de permanencia del producto en el lecho fluidizado mediante la expresión (16).

$$t = \sqrt{\frac{2L}{g \sin \theta}} \quad (15)$$

Donde: L es la longitud del lecho.

5. Calibración del modelo del proceso de secado de la arveja

La calibración del modelo se realiza mediante pruebas de laboratorio. Inicialmente, la experimentación fue orientada a definir los valores de difusividad del producto a distintas temperaturas. Esto, con el fin de utilizarlas como variables de salida del controlador en el proceso de simulación de la estrategia de control. Posteriormente, la experimentación se centró en la determinación del tiempo de permanencia del producto en el lecho fluidizado, a fin de determinar el coeficiente de difusividad para cada temperatura del aire. En principio, se seleccionó una muestra de granos homogéneos de arveja para secar. Luego, se varió la potencia de calefacción del equipo de laboratorio hasta obtener la temperatura del aire deseada en estado estable. Después, se introdujeron los granos de arveja, anotando el valor inicial de humedad, y con intervalos de tiempo (de 3 a 5 min) se extrajeron los granos y se pesaron. Así, al finalizar la prueba, se obtuvieron los valores de pérdida de peso en el tiempo. Finalmente, los datos se compararon con diversas curvas de humedad teórica ajustando el coeficiente de difusión respectivo (ver Figura 5). Como resultado, se puede apreciar que un aumento de la difusividad del agua en el producto permite una mayor velocidad de secado.

Figura 5. Datos experimentales del comportamiento de la humedad

Fuente: elaboración propia.

6. Control difuso del proceso

Para el diseño del controlador se consideró como parámetro relevante del proceso de secado la humedad deseada del producto. En este sentido, la señal de entrada al controlador es definida como la diferencia entre la humedad final y la humedad deseada del producto, mientras las variables a manipular se definieron como la temperatura del aire, la cual permite una variación tanto en la difusividad como en la curva de secado, y la inclinación del lecho fluidizado.

Para el diseño del controlador difuso se definieron funciones de pertenencia de tipo triangular, obtenidas a través de un análisis cualitativo de la dinámica del proceso de secado [15]. Por ejemplo, la Figura 6a presenta las cinco funciones de pertenencia de la variable de entrada, humedad del producto, las cuales fueron definidas de la siguiente manera:

Error Cero: la humedad llega a la humedad deseada.

Error Neg: la humedad está por debajo de la humedad deseada.

Error Muy Neg: la humedad está muy por debajo de la humedad deseada.

Error Pos: la humedad está por encima de la humedad deseada.

Error Muy Pos: la humedad está muy por encima de la humedad deseada.

La Figura 6b presenta las cinco funciones de pertenencia de tipo triangular para la variable manipulada de inclinación, las cuales fueron definidas de la siguiente manera:

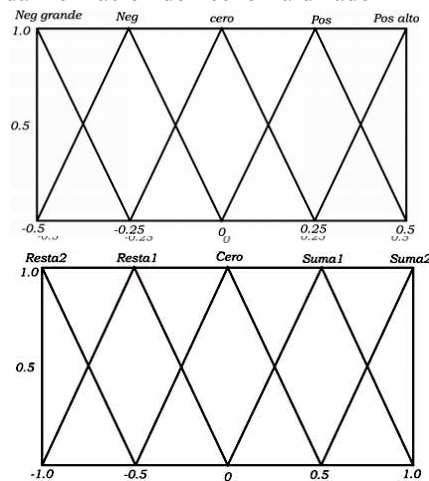
Resta2: resta al valor de la inclinación 1.0 grados.

Resta1: resta al valor de la inclinación 0.5 grados.

Nada: ni suma ni resta.

Suma1: suma al valor de la inclinación 0.5 grados.

Suma2: suma al valor de la inclinación 1.0 grados.

Figura 6. Funciones de Pertenencia. a) Variable de entrada error de humedad del producto. b) Variable de salida inclinación del lecho fluidizado

Fuente: elaboración propia.

La Tabla 1 muestra una síntesis de la información sobre la cual se basa la generación de reglas para el control difuso.

Tabla 1. Reglas para el control difuso

ERROR	INCLINACIÓN					TEMPERATURA				
	RESTA2	RESTA1	NADA	SUMA1	SUMA2	RESTA2	RESTA1	NADA	SUMA1	SUMA2
Pos grande	X									X
Positivo		X								X
Cero			X					X		
Negativo				X			X			
Neg grande					X	X				

Fuente: elaboración propia.

Una muestra de las 25 reglas planteadas para el controlador difuso es expuesta a continuación:

Si (error es pos_grande) entonces (inclinación es resta2) y (temperatura es suma2).

Si (error es pos) entonces (inclinación es resta1) y (temperatura es suma1).

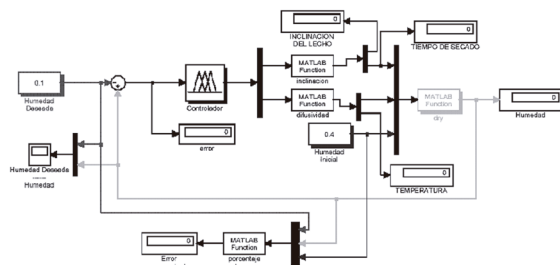
Si (error es cero) entonces (inclinación es nada) y (temperatura es nada).

Si (error es neg) entonces (inclinación es suma1) y (temperatura es resta1).

Si (error es neg_grande) entonces (inclinación es suma2) y (temperatura es resta2).

Para la simulación del comportamiento del controlador se utilizó el modelo del proceso de secado obtenido y se empleó el programa Matlab. La Figura 7 muestra el diagrama de bloques del controlador difuso.

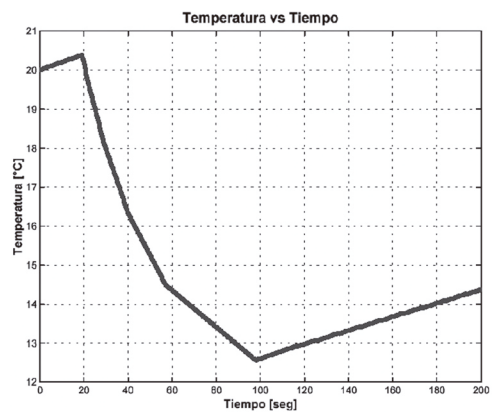
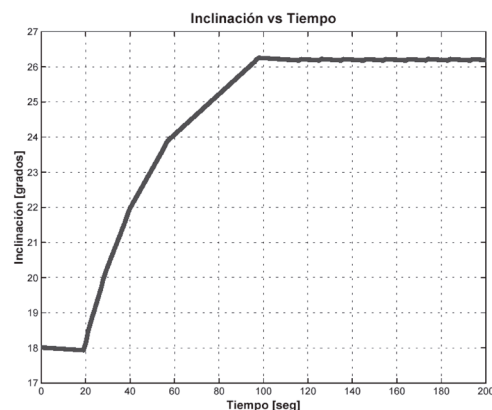
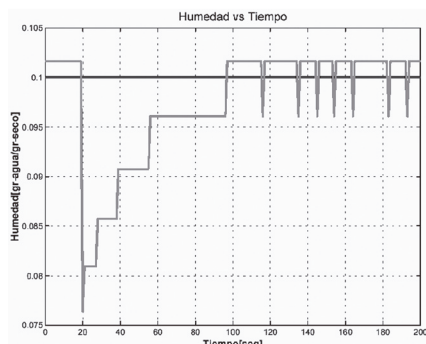
Figura 7. Diagrama de bloques del controlador



Fuente: elaboración propia.

Para evaluar el funcionamiento del controlador se aplicaron dos perturbaciones. La primera incide en la humedad inicial y la segunda afecta la señal de humedad deseada. Para la perturbación en la humedad inicial se consideró un secado con una humedad inicial del producto de 0.102 gr-agua/gr-seco y una humedad deseada de 0.1 gr-agua/gr-seco (gráfica en color azul de la Figura 8a). Se esperó a que el sistema se estabilizara a los 20 seg. Luego, se cambió súbitamente la humedad inicial a 0.0073 gr-agua/gr-seco. Como resultado, la humedad se incrementó alcanzando un valor final de 0.102 gr-agua/gr-seco en un tiempo de 100 seg (gráfica en color rojo de la Figura 8a). Así mismo, el error en el secado de arveja está representado en la diferencia entre la humedad deseada (azul) y la medida (roja) de la Figura 8a. La variable manipulada de inclinación se modificó a una inclinación de 26 grados con un tiempo de establecimiento de 100 seg (ver Figura 8b), mientras la variable manipulada de temperatura presentó una disminución gradual hasta los 100 seg, con un posterior incremento de la variable (ver Figura 8c).

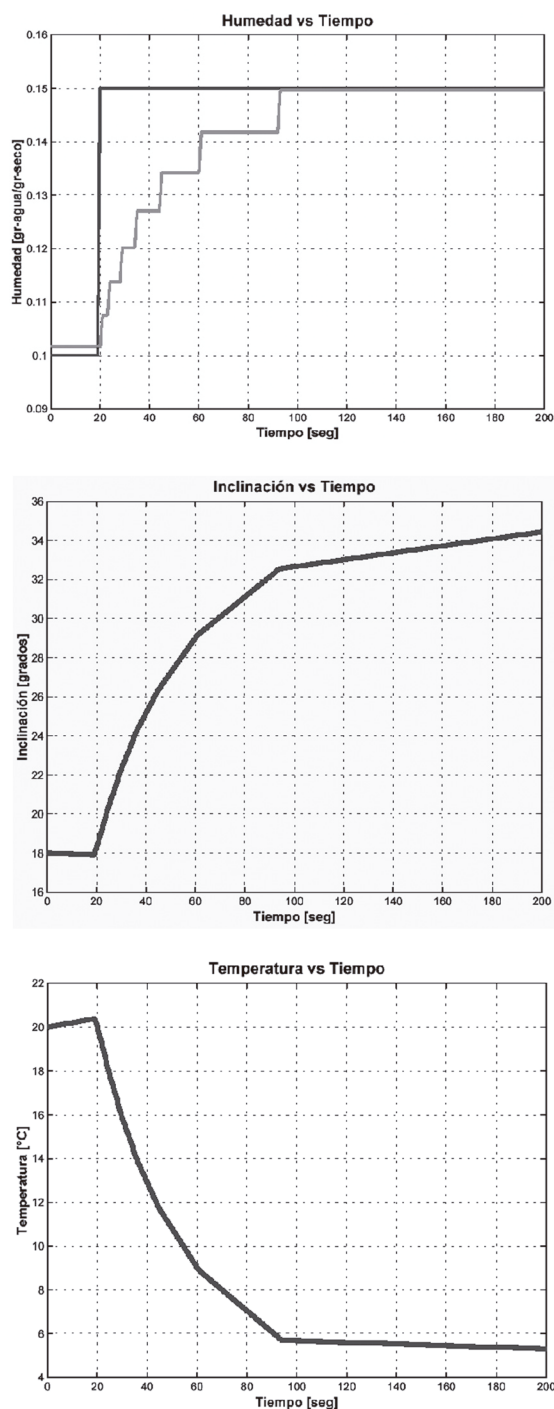
Figura 8. Respuestas por disturbio en la humedad inicial. a) Humedad, b) Inclinación y c) Temperatura



Fuente: elaboración propia.

Para el disturbio en la humedad deseada, el proceso de secado se inició bajo similares parámetros a los de la prueba del disturbio de humedad inicial. Se esperó a que el sistema se estabilizara a los 20 seg y luego, súbitamente, se modificó la humedad deseada a 0.15 gr-agua/gr-seco (gráfica de color azul de la Figura 9a). La respuesta de humedad no presentó oscilaciones, alcanzando un estado estacionario en 85 s (gráfica en color rojo de la Figura 9a). Como resultado, el error en el secado de arveja está representado en la diferencia entre la humedad deseada (azul) y la medida (roja) de la Figura 9a. La variable manipulada de inclinación se modificó a una inclinación de 34 grados con un tiempo de establecimiento de 200 seg (ver Figura 9b), mientras la variable manipulada de temperatura presentó una disminución gradual hasta los 100 seg (ver Figura 9c).

Figura 9. Respuesta ante disturbio en humedad de-seada. a) Humedad, b) Inclínación y c) Temperatura



Fuente: elaboración propia.

7. Conclusiones

Un modelado, calibración, diseño e implementación de un controlador difuso para el proceso de secado de arveja en lecho fluidizado fue desarrollado en este trabajo. Para el modelo se utilizó la ley de difusión de Fick. Se solucionó la

ecuación diferencial no lineal de segundo orden, con la cual se obtuvieron resultados satisfactorios en el rango establecido.

Se diseñó una estrategia de control por lógica difusa para el secado por lecho fluidizado de la arveja, a través de la cual se manipuló la dinámica no lineal del sistema con el conocimiento de una serie de acciones frente a posibles estados del proceso. Se logró un error por debajo del 2 % utilizando este controlador, siendo posible disminuir dicho error aumentando el número de filas en el vector de humedades.

Como trabajo futuro queda abierta la posibilidad de seguir probando otras estrategias de control que incorporen un esquema adaptativo y óptimo en el seguimiento no lineal de la referencia.

Agradecimientos

A los ingenieros Carlos Buitrago, Joao Ealo y Juan Carlos Burbano por la colaboración en la elaboración de este trabajo. ●

Referencias

- [1] Fenalce. (2010). *El cultivo de la arveja, historia e importancia*. Recuperado el 20 de abril de 2015, de http://www.fenalce.org/arch_public/arveja93.pdf.
- [2] Vallejo Franco, A. (2007). Las hortalizas en Colombia. *Horticultura Brasileira* 25, 1.
- [3] Peñaranda, C. G. & Molina, G. D. Y. (2011). La Producción de Arveja (*Pisum Sativum*) en la Vereda Monteadentro, Provincia de Pamplona, Norte de Santander. *Revista Face* 43 – 56. ISSN 1794-9.
- [4] FAO. (s. f.). *Secado de granos y secadora*. Recuperado el 20 de abril de 2015, de <http://www.fao.org/docrep/x5028s/x5028s02.htm>.
- [5] Ochoa Martínez, L. A., Machuca Rosales, S., Montoya Ayón, L. & Pérez Ricardez, A. (1997). *Performance of an unheated fluidised bed dryer*. In *Engineering & Food at 7th International Congress on Engineering and Food*.
- [6] Abramovitch, Y. D. & Bushnell, G. L. (1998). Report on the Fuzzy versus Conventional Control Debate, In *Proc. IEEE Conference on Decision*, pp. 88 - 90.
- [7] Liu, H., Zhang, J., Tang, X. & Lu, Y. (2003). Fuzzy Control of Mixed-Flow Grain Dryer. *Drying Technology*, 21, 5, 807 - 819.

- [8] Watano, S. & Miyanami, K. (1999). *Control of Granulation Process by Fuzzy Logic*. IEEE 905 - 908.
- [9] Atthajariyakul, S. & Leephakpreeda, T. (2006). Fluidized bed paddy drying in optimal conditions via adaptive fuzzy logic control. *Journal of food engineering* 75, 104 - 114.
- [10] Yuzgec, U., Turker, M. & Becerikli, Y. (2004). *Modelling of Batch Fluidized Bed Drying of Baker Yeast for Cylindrical Pellets*, IEEE 7 - 12.
- [11] Lutfi, F. O., Selamatb, H. & Noorc, B. S. (2015). Intelligent Modelling and Control of a Conveyor-Belt Grain Dryer Using a Simplified Type-2 Neuro-Fuzzy Controller. *Journal Taylor & Francis Online*. DOI:10.1080.
- [12] Turns, S. R. (1996). *An Introduction to Combustion, concepts and applications*. McGraw-Hill.
- [13] Méndez, R. & Villa, D. (2005). *Extensión de un modelo de difusión de partículas contaminantes en medios acíferos planos*. Biomatemática, Imecc, Unicamp.
- [14] Chapra, S. & Canale, R. (2003). *Métodos Numéricos para Ingenieros*. México: Mc Graw-Hill.
- [15] Baker C. (1997). *Industrial Drying Foods*. Blackie Academ & Profess.
- v_{in} Velocidad al inicio del lecho (m/s)
- g Aceleración de la gravedad (m/s²)
- v_f Velocidad al final del lecho (m/s)
- h Altura de la inclinación del lecho (m)
- L Longitud del lecho (m)
- R Radio total (m)
- N Número de divisiones o capas de la arveja
- $.n$ Capa evaluada

Anexo

Unidades y nomenclatura

- r Radio de la esfera (m)
- ρ Densidad total (kg/m³)
- \dot{n}_A Cambio de la difusividad del agua en la arveja con respecto al tiempo (kg/m³s)
- D_{AB} Densidad de masa de la fase A (m²/s)
- m_A Fracción de masa de la fase A
- ρ_A Densidad de la fase A (kg/m³)
- t Tiempo (s)
- X Humedad
- Vol Volumen (m³)
- m_i Masa del producto al inicio del lecho (kg)
- E Pérdida de energía en el trayecto (J)
- m_f Masa del producto al final del lecho (kg)